Спектральные и кинетические характеристики флуоресценции растворенного органического вещества в условиях редокс-стратификации озера Большие Хрусломены

© Ю.Г. Соколовская[1], Е.Д. Краснова[2], Д.А. Воронов[3], С.А. Буриков[1], Т.А. Доленко[1], С.В. Пацаева[1]

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, биологический факультет, Москва, Россия
[3] Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

e-mail: yu.sokolovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 26.11.2025 г.
В окончательной редакции 19.01.2026 г.
Принята к публикации 27.03.2026 г.

Исследованы оптические свойства растворенного органического вещества (РОВ) природной воды из стратифицированного озера Большие Хрусломены в летнем сезоне 2025 г. Проведено измерение спектров поглощения, спектров испускания флуоресценции и кинетики флуоресценции. Показано, что наибольшая оптическая плотность характерна для придонных горизонтов. Выявлено, что зависимости оптических плотностей на выбранных длинах волн от глубины слоя имеют локальный минимум в области редокс-перехода. Показано наличие „белковоподобной“ и гуминовой полос флуоресценции, причем белковоподобная флуоресценция проявляется не на всех глубинах. Наибольшая величина белковоподобной флуоресценции наблюдается в слоях с криптофитовыми водорослями и слоях с аноксигенными фототрофными бактериями. Рассчитана зависимость квантового выхода флуоресценции (КВФ) от длины волны возбуждения, показано, что характер зависимости, а также абсолютная величина КВФ согласуются с данными, полученными ранее для других беломорских меромиктических водоемов. Построены зависимости КВФ от горизонта отбора пробы, показано, что они имеют минимум под началом хемоклина. По кинетике затухания флуоресценции рассчитаны времена жизни и соотношения амплитуд короткой и долгоживущей компонент флуоресценции РОВ. Времена жизни флуоресценции схожи на разных горизонтах отбора проб, несмотря на различие гидрохимических характеристик.

Ключевые слова: растворенное органическое вещество (РОВ), гуминовая флуоресценция, белковоподобная флуоресценция, природная вода, прибрежные меромиктическое водоемы, спектроскопия поглощения, квантовый выход флуоресценции, синхронные спектры флуоресценции, время жизни флуоресценции.

DOI: 10.61011/OS.2026.06.63409.70-25

Введение

Известно, что растворенное органическое вещество (РОВ) — обязательный компонент природной воды. Оно играет значительную роль в природных биогеохимических процессах и оказывает влияние на функционирование водных экосистем водоемов [1–3]. РОВ может как поступать в водоем извне, с водосбора (аллохтонное РОВ), так и образовываться в самом водоеме как продукт биохимического распада остатков микроорганизмов, населяющих водоем (автохтонное) [1,4]. Содержание РОВ в водоеме зависит от многих факторов, в том числе от гидрологического режима, типа почвы в водосборном бассейне, климатических условий, присутствия и активности микроорганизмов. От состава и концентрации РОВ зависят оптические свойства природной воды. Окрашенное РОВ природного происхождения эффективно поглощает УФ и видимый свет, а также люминесцирует. Поэтому в настоящее время для его исследования успешно применяются методы спектроскопии поглощения света и флуоресцентной спектроскопии. Спектры поглощения и флуоресценции природной воды можно использовать для качественной и количественной характеристики РОВ природной воды. Например, в экологическом мониторинге и дистанционном зондировании интенсивность сигнала флуоресценции используется для оценки концентрации РОВ в природной воде [3]. Так, например, флуоресцентную спектроскопию и спектроскопию поглощения использовали для исследования РОВ природной воды: Карского моря [5,6], моря Лаптевых [6], Онежского залива Белого моря [7], Баренцева [8–11] и Норвежского морей [9], Японского моря [12,13], Восточно-Сибирского моря [14], Азовского моря [15].

Особого внимания с точки зрения исследования распределения и состава РОВ в различных горизонтах заслуживают меромиктические водоемы — водоемы с устойчивой вертикальной стратификацией, возникающей из-за разной плотности слоев воды. Меромиктические водоемы могут образовываться как естественным пу-

тем, в частности, при изоляции от морской акватории (например, в случае прибрежных водоемов беломорского региона в результате послеледникового поднятия берега [16,17]), или же искусственным путем [16–19]. В природных меромиктических озерах есть верхний аэробный слой воды и нижний слой с более высокой плотностью, который не перемешивается с верхним, переходная градиентная зона между двумя этими слоями называется хемоклином. В верхней части хемоклина в небольшом количестве еще есть растворенный кислород, а в нижней части хемоклина с анаэробными условиями при условии проникновения солнечного света могут в массе развиваться аноксигенные фототрофные бактерии [19,20]. Исследование РОВ в разных слоях прибрежных водоемов, находящихся на разных стадиях изоляции от моря, важно для понимания их эволюции и для разработки методов экологического мониторинга водных экосистем.

Цель данной работы — изучение спектрально-люминесцентных свойств РОВ природной воды из озера Большие Хрусломены — прибрежного водоема с антропогенной изоляцией от моря. Для этого были проведены измерения спектров поглощения света и спектров испускания флуоресценции при разных длинах волн возбуждения, сделан расчет квантового выхода флуоресценции. Также выполнено сравнение с данными, полученными ранее для других искусственно и естественно отделенных водоемов.

Объект исследования и характеристики воды

Озеро Большие Хрусломены расположено на острове Олений в губе Ковда Кандалакшского залива Белого моря. Площадь озера 75 ha, максимальная глубина 21 m в точке с координатами 66°43′1″N, 32°51′34″E. Озеро отделено от моря валунной перемычкой, через которую во время прилива в него непродолжительное время поступает морская вода, но большую часть времени течение направлено из озера в море [21]. Озеро Большие Хрусломены было изолировано от моря в 1895 г. При строительстве на острове лесопильного завода, для снабжения его паровых машин пресной водой, заливы Большие и Малые Хрусломены каменными преградами были отделены от моря и стали одноименными озерами. В озере Большие Хрусломены из-за большой глубины и притока пресной воды с водосбора вскоре после его отделения от моря возникла меромиктическая структура с сульфидной аноксией. Верхние 2 m водной толщи солоноватые, в разные годы соленость колеблется от 4 до 7 ‰. Ниже соленость резко возрастает и на глубине 10 m достигает 23–24 ‰, что соответствует солености в Белом море. На глубине 3.7–4.5 m начинается анаэробная зона с высокой концентрацией сероводорода, превышающей 600 mg/l [22]; зимой граница распространения сероводорода поднимается до глубины 2.5–3.5 m. Над его границей в летнее время образуется розоватая прослойка воды из-за массового развития криптофитовых микроводорослей *Rhodomonas*. В начале сульфидной зоны вода окрашена в коричневатый цвет из-за высокой концентрации бактерий, около 20% которых составляют зеленые серные бактерии [23]. Зона с глубины 12 m до дна характеризуется одинаковыми по вертикали и постоянными во времени физико-химическими параметрами, включая температуру 7.3°C. По данным гидрологического мониторинга, начатого в 2010 г., вертикальная структура озера Большие Хрусломены очень стабильна, что отличает его от большинства других беломорских меромиктических водоемов и сближает с озером Трехцветное, отделившимся от моря естественным путем в результате послеледникового поднятия берега. Озеро Трехцветное, в отличие от озера Большие Хрусломены, полностью отделено от моря, его поверхностный слой полностью опреснен, глубина втрое меньше (7.5 m), максимальная соленость возле дна 22 ‰, а концентрация сероводорода в придонной зоне обоих озер примерно одинакова.

Пробы воды отбирали в июле 2025 г. В разных частях озера на одной и той же глубине физико-химические параметры различаются незначительно по сравнению с различиями по вертикали. Пробы отбирали над глубокой впадиной, где представлены все слои, характерные для меромиктического водоема, в точке с максимальной глубиной. Глубже 13.5 m пробы не отбирали, так как по данным гидрологических измерений ниже гидрохимические параметры не меняются.

Для отбора проб использовали погружной насос с размеченным кабелем. Предварительно измеряли физико-химические характеристики воды на разной глубине. Глубины, с которых производили отбор, температура, соленость воды на этих глубинах, окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и pH представлены в табл. 1. В хемоклине (переходной зоне между аэробной и сульфидной зонами) пробы отбирали с меньшим шагом, чем в поверхностной и придонной зонах.

Методика исследования

Для отделения РОВ перед спектральными измерениями отобранные пробы воды были отфильтрованы через нейлоновые шприцевые фильтры с диаметром пор 0.22 μm. Спектры поглощения РОВ регистрировали на спектрофотометре Solar PB2201 в диапазоне длин волн от 200 до 800 nm относительно дистиллированной воды с шагом сканирования 1 nm. Для повышения точности измерений использовали стандартные кварцевые кюветы с длиной оптического пути 3 cm, в дальнейшем оптические плотности пересчитывали на длину оптического пути 1 cm. Спектры регистрировали при комнатной температуре.

Спектры испускания флуоресценции РОВ были получены на спектрофлуориметре Solar CM2203 при длинах волн возбуждения флуоресценции γ_{ex} от 250 до 500 nm с шагом 10 nm. Регистрацию спектров проводили в диапазоне от 260–515 nm до 700 nm (в зависимости от длины волны возбуждения, от 260 до

Таблица 1. Физико-химические характеристики воды из исследуемых горизонтов озера Большие Хрусломены

Глубина, m	t, °C	S, ‰	Eh	pH
0	15.3	5.9	120	8.37
1	15.3	5.9	92	8.51
2	15.3	8	90	8.32
3	11.8	13.1	97	7.85
3.5	10.8	13.7	96	7.59
3.7	10.2	14.5	91	7.35
3.8	10	14.8	60	7.54
3.9	9.7	15.1	40	7.43
4	9.3	15.4	−123	7.61
4.1	9.1	15.6	−247	7.18
4.2	9.3	15.6	−269	7.14
4.3	8.9	16.2	−280	7.03
4.5	8.6	16.8	−296	6.97
5	8.7	18	−303	6.9
7	8.3	20.9	−326	7.2
10	9	23.2	−323	6.89
13.5	8.7	23.7	−331	6.92

700 nm при $\gamma_{ex} = 250$ nm и от 515 до 700 nm при $\gamma_{ex} = 500$ nm) с шагом 1 nm. Данные диапазоны длин волн возбуждения и регистрации для спектров испускания выбраны исходя из известной информации о характерных полосах флуоресценции гуминовой и белковой составляющей РОВ [24,25]. Размеры входной и выходной щелей монохроматора составляли 5 nm. Для измерения спектров флуоресценции использовали стандартные кварцевые кюветы с длиной оптического пути 1 cm. Далее измеренные спектры флуоресценции были скорректированы с учетом эффекта внутреннего фильтра: $I = I_0 \cdot 10^{D_{ex}+D_{em}/2}$ (D_{ex} и D_{em} — оптические плотности на длинах волн возбуждения и регистрации флуоресценции соответственно).

Для характеристики РОВ природной воды использовали оптическую плотность на длинах волн 250, 270, 280, 350 и 380 nm, а также отношение оптических плотностей $D_{270\,\mathrm{nm}}/D_{350\,\mathrm{nm}}$. Более длинноволновую область спектров не использовали из-за малой величины оптической плотности в этом диапазоне. Еще один информативный показатель — квантовый выход флуоресценции (КВФ). Для молекул красителей (а также для окрашенного РОВ) КВФ определяется как отношение количества испущенных фотонов к количеству поглощенных фотонов и показывает вероятность, что флуорофор будет излучать свет при возвращении в основное состояние после возбуждения светом [26]. Среди компонентов РОВ природной воды имеются как соединения, флуоресцирующие в результате поглощения фотона, так не флуоресцирующие, но поглощающие свет. Большая величина КВФ характерна для РОВ с более высоким содержанием ароматических групп.

КВФ (ϕ) для РОВ рассчитывали по спектрам испускания флуоресценции и спектрам поглощения света с использованием метода эталонных растворов (см., например, [26,27]). В качестве эталонного раствора с известным КВФ был взят водный раствор сульфата хинина, расчеты проводились по формуле:

$$\phi = \phi_{qs}\frac{K}{K_{qs}},$$

где ϕ — квантовый выход флуоресценции исследуемой пробы РОВ, K и K_{qs} — отношения интегральной по спектру интенсивности флуоресценции к оптической плотности на длине волны возбуждения для пробы РОВ и эталонного раствора соответственно, $\phi_{qs} = 0.546$ — квантовый выход флуоресценции сульфата хинина [27].

Эксперимент по исследованию кинетики флуоресценции РОВ был проведен на установке на базе спектрофлуориметра OmniFluo-900 (Zolix Instruments, Китай). Возбуждение осуществлялось с помощью импульсного пикосекундного лазера CNI Laser SSP-MD-PSL-375.55-30-2 (длина волны 373 nm, мощность 139.9 μW, длительность импульса 200-1000 ps), регистрация — с помощью ФЭУ PMT R13456, работающего в режиме счета фотонов. Спектры флуоресценции регистрировались в диапазоне 385−700 nm с шагом 0.5 nm. Установка позволяла получать кинетические кривые затухания люминесценции в режиме время-коррелированного счета фотонов (TCSPC — *time-correlated single photon counting*), блок сбора данных DCS900PC. В качестве аппаратной функции прибора (IRF — *instrument response function*) выступала кинетическая кривая, полученная для сигнала упругого рассеяния света дистиллированной водой на длине волны возбуждения 373 nm. Обработка кинетических кривых осуществлялась с использованием программного пакета Omni-Win v.1.2.37 и представляла собой деконволюцию кривой затухания флуоресценции исследуемого образца и аппаратной функции прибора. Наилучшее согласие экспериментальной кинетики и модели было получено в приближении двух временных компонент.

Результаты и обсуждение

Спектры поглощения света РОВ

Спектры поглощения света РОВ с разной глубины оз. Б. Хрусломены приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что оптическая плотность уменьшается с ростом длины волны, что является типичным для РОВ природной воды [28], при этом около 260−270 nm заметно характерное плечо [29,30], возникающее из-за присутствия фенольных групп или ароматических аминокислот в образце РОВ. Иных особенностей или пиков в диапазоне длин волн 200−800 nm не обнаружено. Наибольшие оптические плотности соответствуют глубинам 7, 10 и 13.5 m, что свидетельствует о накоплении РОВ в анаэробной зоне. Значения оптической плотности D, измеренные на длинах волн возбуждения флуоресценции, далее были использованы для расчета квантового выхода флуоресценции.

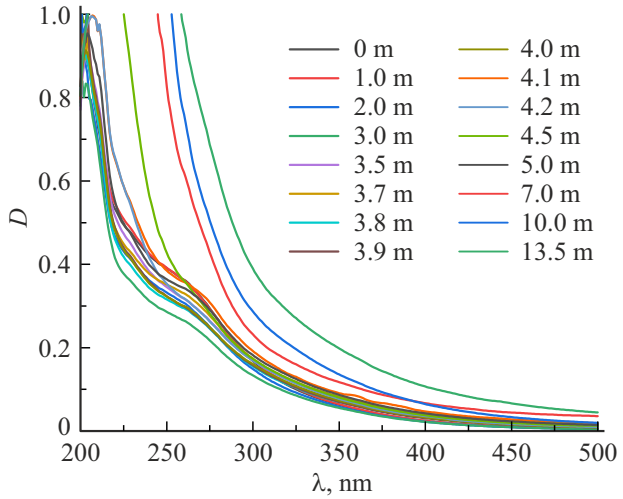

Рис. 1. Спектры поглощения света РОВ в воде из различных горизонтов озера Большие Хрусломены.

На рис. 2, *a*, *b* представлены графики зависимости оптической плотности воды на длинах волн 250, 270, 280, 310, 350, 380 nm от глубины и солености. Видно, что оптические плотности плавно спадают до глубин 3–4 m (то есть при приближении к хемоклину), и после 4.1–4.2 m (то есть практически сразу после редокс-перехода) начинают заметно возрастать. Величина оптической плотности в придонном слое примерно в 2.5–3 раза больше, чем в приповерхностном и в области хемоклина. Для сравнения, в пробах из Федосеевского плеса, который также является меромиктическим водоемом, искусственно отделенным от моря, была получена качественно аналогичная зависимость $D_{250\,\mathrm{nm}}$, $D_{270\,\mathrm{nm}}$, $D_{280\,\mathrm{nm}}$ от глубины: данные величины существенно возрастали ниже редокс-перехода. Однако разница оптических плотностей придонной и приповерхностной воды была значительнее и достигала 8 раз [18]. Различия обусловлены более высоким содержанием РОВ в поверхностных слоях озера Большие Хрусломены. На рис. 2, *c* приведена зависимость отношения оптических плотностей на длинах волн 270 и 350 nm от глубины. Здесь наблюдается резкий локальный минимум в хемоклине, что говорит о том, что величина $D_{270\,\mathrm{nm}}/D_{350\,\mathrm{nm}}$ существенно зависит от горизонта и может использоваться как информативный параметр для описания структуры стратифицированного водоема с меняющимся по глубине редокс-потенциалом. Далее эти две длины волны используются для возбуждения флуоресценции РОВ.

Спектры испускания и квантовый выход флуоресценции РОВ

При возбуждении флуоресценции РОВ излучением с длиной волны 270 nm спектр испускания представляет собой две частично перекрывающиеся полосы флуоресценции: „белковоподобную“ УФ-полосу свечения с максимумом 300–350 nm и гуминовую полосу с длиной волны 450–500 nm [18,29,30]. Стоит заметить, что белковоподобная флуоресценция не является именно флуоресценцией белков в чистом виде (термин „белковоподобная“, или *protein-like*, означает флуоресценцию, похожую на спектры испускания белков), она соответствует фенольным соединениям или ароматическим аминокислотам в составе РОВ. При возбуждении светом с длиной волны 300 nm и более белковоподобная флуоресценция не наблюдается; вторая, более длинноволновая полоса относится к флуоресценции гуминовых соединений, которые образуются при деградации биомолекул и путем конденсации их фрагментов. В зарегистрированных спектрах испускания также заметен сигнал комбинационного рассеяния света (КРС) молекулами воды в виде небольшого узкого пика на коротких длинах волн с максимумом, интенсивность и положение которого зависят от длины волны возбуждения. Например, при возбуждении длиной волны 270 nm пик КРС расположен при ≈ 290 nm; при длине волны возбуждения 355 nm линия КРС практически сливается с основной полосой флуоресценции РОВ.

На рис. 3 приведены примеры зарегистрированных спектров испускания флуоресценции РОВ (скорректированные с учетом эффекта внутреннего фильтра) для приповерхностного горизонта 1 m и горизонта непосредственно под редокс-переходом — 4.1 m. Эти спектры различаются: на глубине 4.1 m есть интенсивная полоса белковоподобной флуоресценции, в то время как на 1 m наблюдается только гуминовая полоса. При этом амплитуды гуминовых полос различаются незначительно. Далее полученные спектры испускания использовались для расчета КВФ для каждого горизонта.

На рис. 4 приведены зависимости $\phi(\gamma_{ex})$ ($\gamma_{ex} = 250–500$ nm) для РОВ на глубинах 1 m и 4.1 m. Из рисунков видно, что на этих глубинах практически одинаков характер зависимостей $\phi(\gamma_{ex})$, а абсолютные величины КВФ практически совпадают. Некоторое отличие в спектральном диапазоне 250–300 nm, вероятно, связано с различным соотношением белковой и гуминовой компонент РОВ (на глубине 4.1 m отмечено присутствие зеленых серных бактерий). Зависимость КВФ от длины волны возбуждения немонотонна, в области 250–500 nm она имеет по два локальных максимума и минимума: минимумы наблюдаются при $\gamma_{ex} \approx 290 - 300$ nm и $\gamma_{ex} \approx 360$ nm, а максимумы при $\gamma_{ex} \approx 340$ nm и 370–390 nm. Величины КВФ для диапазона возбуждения $\gamma_{ex} = 250–500$ nm ранее были рассчитаны авторами данной статьи и для других меромиктических водоемов беломорского побережья, находящихся на разных стадиях изоляции от моря: озера Кисло-Сладкое [28], озер Еловое, Трехцветное [31], Лагуны на Зеленом мысе [32], Федосеевского плеса губы Канда, а также для морской части губы Канда, которая не является меромиктическим водоемом [18]. В этих водоемах зависимость имеет качественно такой же характер и отличается только абсолютными

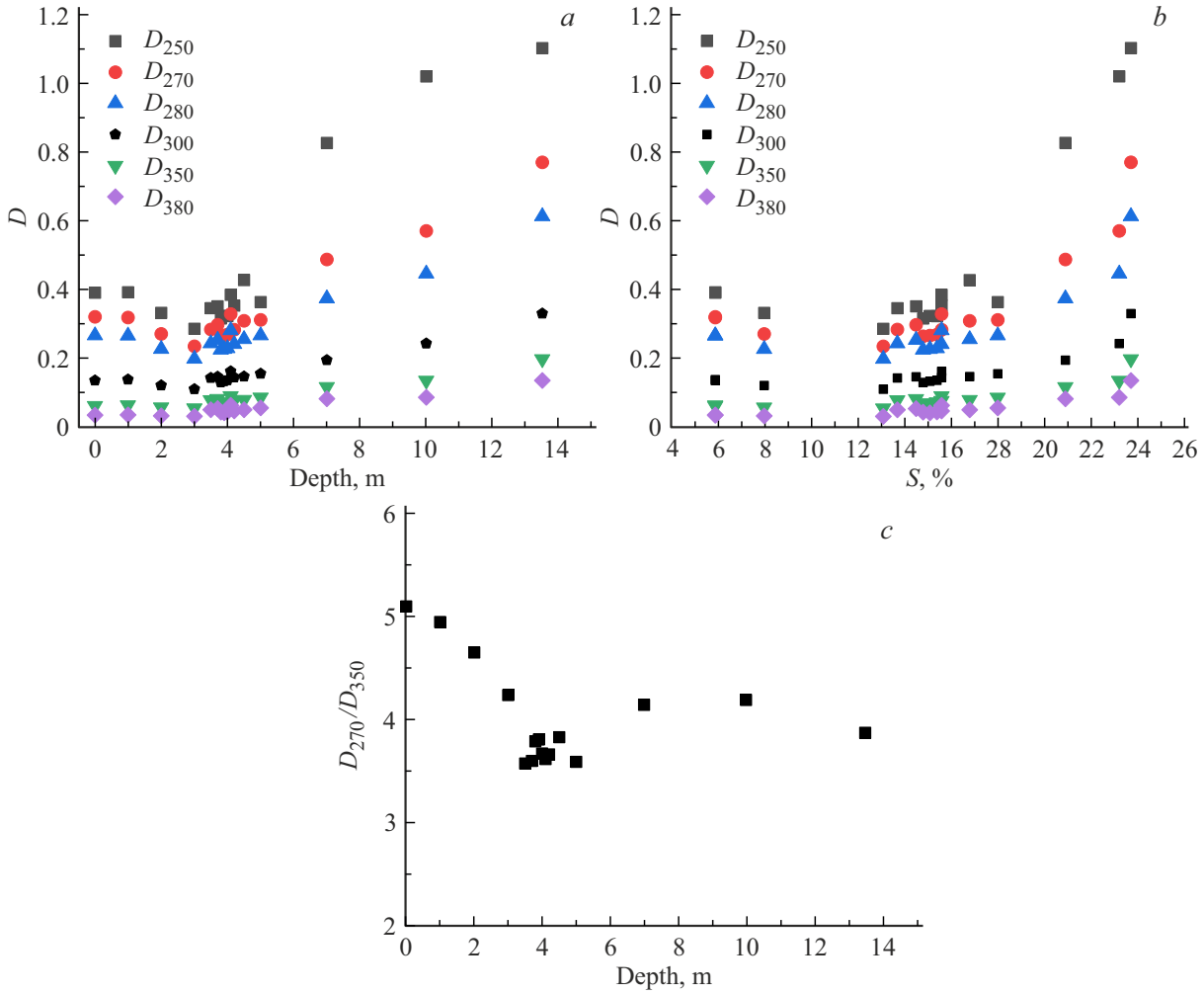

Рис. 2. Зависимость оптической плотности РОВ на длинах волн 250, 270, 280, 310, 350, 380 nm от глубины (a) и солености (b) и зависимость отношения оптических плотностей $D_{270\,\mathrm{nm}}/D_{350\,\mathrm{nm}}$ от глубины (c).

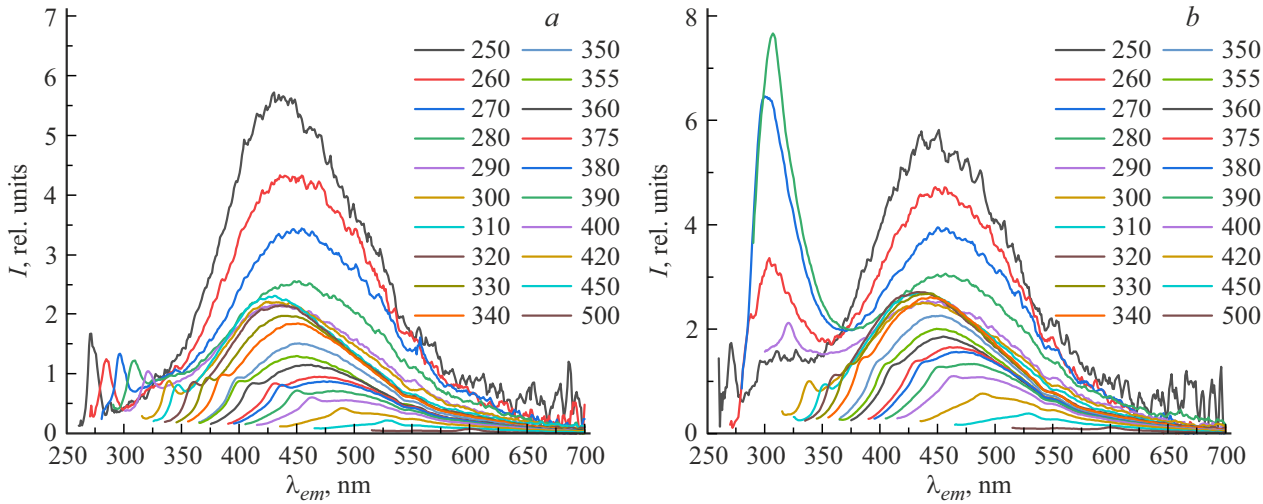

Рис. 3. Спектры испускания флуоресценции РОВ оз. Большие Хрусломены, горизонты 1 m (a) и 4.1 m (b).

величинами КВФ. В оз. Кисло-Сладкое минимум КВФ (на длинах волн 290–300 nm) равен примерно 1%, а максимум около 2.4%, в озерах Трехцветное и Еловое минимум КВФ примерно равен 0.8%, в Лагуне на Зеленом мысе — примерно 1%, в губе Канда — 1.6%, а абсолютный максимум (на 380 nm) равен 2.1 и 2.8% в озерах Трехцветное и Еловое соответственно, и почти 3% в Лагуне на Зеленом мысе и морской части губы Канда. Таким образом, для рассматриваемого в данной работе оз. Б. Хрусломены величины минимума и максимума КВФ также укладываются в диапазон значений для других беломорских мероминктических водоемов.

На рис. 5 представлены зависимости КВФ на длинах волн возбуждения 270 и 355 nm от глубины. Локальный минимум на глубине 4 m соответствует редокс-переходу. Над этим горизонтом на 3.8 m вода имела розоватый цвет, обусловленный наличием криптофитовых водорослей *Rhodomonas* [33,34]. На глубинах 3.9–4.2 m отмечено присутствие зеленых серных бактерий. С этими микроорганизмами может быть связано высокое содержание белковоподобной компоненты РОВ по сравнению с вышележащими слоями, где преобладает гуминовое вещество. На 5 m и глубже КВФ также несколько выше, чем в приповерхностных слоях, что может быть вызвано накоплением РОВ на глубине. Полученные результаты можно сравнить с данными летних сезонов предыдущих лет для мероминктического Федосеевского плеса из работы [18], для Лагуны на Зеленом мысе [32], а также для озера Кисло-Сладкое [30]. Оказалось, что результат качественно довольно схож с аналогичной зависимостью для озера Кисло-Сладкое, полученной в июне 2024 г., где также наблюдался локальный минимум возле редокс-перехода, и диапазон абсолютных величин КВФ тоже практически совпадал. Результаты для Лагуны на Зеленом мысе отличаются сильнее как по абсолютным значениям, так и тем, что локальный минимум для озер Большие Хрусломены и Кисло-Сладкое выражен более явно. Наконец, результаты для Федосеевского плеса незначительно отличаются по абсолютной величине КВФ, но при этом качественно зависимость КВФ от глубины была иной, монотонной, без локального минимума в хемоклине, что, вероятно, объясняется более глубоким его расположением (11 m).

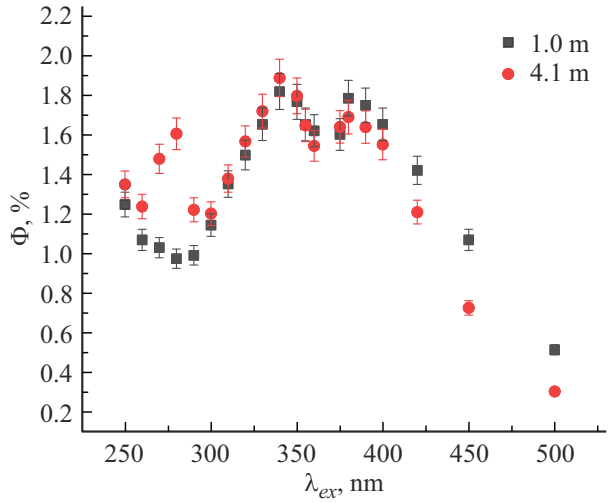

Рис. 4. Зависимость КВФ от длины волны возбуждения на горизонтах 1 и 4.1 m.

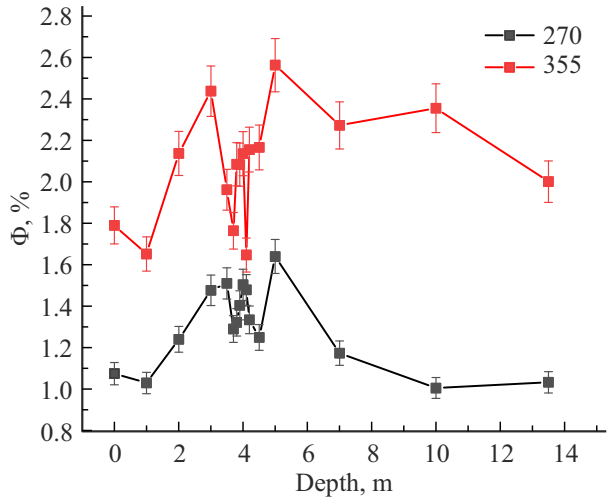

Рис. 5. Зависимость КВФ для возбуждения светом с длиной волны 270 и 355 nm от глубины.

Кинетика флуоресценции и время жизни флуоресценции РОВ

Эксперимент по исследованию кинетики флуоресценции РОВ проводили при возбуждении светом с длиной волны 373 nm и регистрации на 470 nm, т. е. для гуминовой полосы флуоресценции и возбуждении в одном из максимумов зависимости КВФ от длины волны. Кинетика затухания флуоресценции РОВ при импульсном лазерном возбуждении показана на рис. 6.

Рассчитанные времена жизни компонент кинетических кривых гуминовой флуоресценции для проб РОВ озера Большие Хрусломены приведены в табл. 2. Главная компонента кинетики имела время жизни флуоресценции около 2 ns, у более медленной компоненты — около 9 ns. Погрешности измерения времени жизни составили 0.1 ns для короткой компоненты и 0.2 ns для более длительной компоненты. Погрешности оценки амплитуды составили 5%. В результате получено, что времена жизни и соотношения амплитуд короткой (1.9–2.2 ns) и долгоживущей компонент (8.9–9.6 ns) гуминовой флуоресценции практически не зависели от горизонта отбора проб, хотя вода из разных слоев озера существенно отличалась по гидрологическим характеристикам и, как уже было показано выше, по спектрам испускания флуоресценции. Это позволяет сделать вывод об одинаковой природе гуминовой полосы флуоресценции РОВ в разных слоях данного водоема. Найденные значения времени жизни флуо-

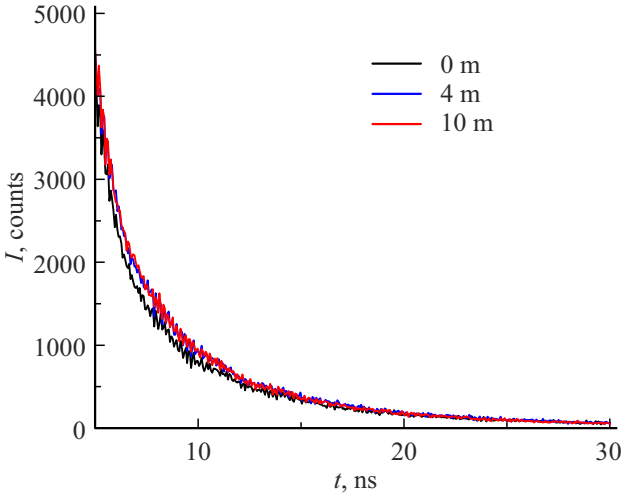

Рис. 6. Кинетика затухания флуоресценции РОВ при импульсном лазерном возбуждении.

Таблица 2. Рассчитанные времена жизни двух компонент кинетики флуоресценции РОВ t_1 и t_2, амплитуды A_1 и A_2, площади S_1 и S_2 первой и второй компоненты

Глубина, m	t_1, ns	t_2, ns	A_1	A_2	S_1, %	S_2, %
0	1.99	9.39	2.29	0.17	74.7	25.3
1	2.05	9.62	2.01	0.15	74.7	25.2
2	2.17	9.33	2.12	0.18	73.2	26.8
3	2.18	9.26	2.08	0.19	71.8	28.1
3.5	2.17	9.26	2.02	0.19	71.2	28.8
3.7	2.15	9.10	2.07	0.19	71.8	28.1
3.8	2.19	9.16	2.07	0.19	72.6	27.4
3.9	2.18	9.14	2.03	0.19	71.5	28.5
4	2.18	9.26	2.08	0.19	71.8	28.1
4.1	2.18	9.14	2.12	0.19	73.0	26.9
4.2	2.22	9.26	2.01	0.19	72.1	27.9
4.5	2.26	9.28	1.98	0.19	71.8	28.2
5	2.30	9.35	1.94	0.19	71.1	28.8
7	2.33	9.24	1.94	0.20	71.4	28.6
10	2.30	9.05	1.93	0.19	72.5	27.5
13.5	2.25	8.94	2.01	0.19	73.2	26.8

ресценции РОВ находятся в хорошем согласии с известными временами флуоресценции по литературным данным [35–37].

Заключение

В работе впервые исследованы оптические свойства растворенного органического вещества (РОВ) природной воды из стратифицированного озера Большие Хрусломены с переменным по глубине окислительно-восстановительным потенциалом. Отбор проб проводили в летнем сезоне 2025 г. Измерены спектры поглощения, спектры испускания флуоресценции и кинетика флуоресценции. Полученные спектры поглощения характерны для РОВ природной воды; наибольшая оптическая плотность зарегистрирована в придонных горизонтах. Построены зависимости оптических плотностей на длинах волн 250, 270, 280, 310, 350, 380 nm от глубины, с которой отобраны пробы воды. Полученные зависимости имеют локальный минимум в хемоклине сразу под редокс-переходом. В спектрах испускания флуоресценции зарегистрированы „белковоподобная“ и гуминовая полосы флуоресценции. Белковоподобная флуоресценция проявлялась не на всех глубинах, наибольшая ее величина отмечена в слоях с высокой численностью микроорганизмов: криптофитовых водорослей и аноксигенных фототрофных бактерий. Рассчитана зависимость квантового выхода флуоресценции (КВФ) от длины волны возбуждения, показано, что характер зависимости, а также абсолютная величина КВФ аналогичны с таковыми в других беломорских меромиктических водоемах (озерах Кисло-Сладкое, Еловое, Трехцветное, Лагуне на Зеленом мысе, Федосеевском плесе). Построены зависимости КВФ для длин волн 270, 310 и 355 nm от горизонта отбора пробы, показано наличие минимума в начале анаэробной зоны. По кинетике затухания флуоресценции рассчитаны времена жизни и соотношения амплитуд короткой и долгоживущей компонент флуоресценции РОВ. Времена жизни флуоресценции являются похожими на разных горизонтах отбора проб, несмотря на различие гидрохимических характеристик.

Благодарности

Авторы благодарят администрацию Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова за поддержку экспедиционных работ. Часть экспериментальных результатов, использованных в настоящей работе, получена с помощью системы высокоскоростного анализа кинетики затухания люминесценции веществ, закупленной по Программе развития МГУ (Соглашение № 231 от 06.06.2023).

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

Список литературы

[1] Е.А. Романкевич, А.А. Ветров, В.И. Пересыпкин. Геология и геофизика, **50** (4), 401 (2009). [E.A. Romankevich, A.A. Vetrov, V.I. Peresypkin. Rus. Geol. Geophys., **50** (4), 291 (2009)].

[2] Е.А. Романкевич. *Геохимия органического вещества в океане* (Наука, М., 1977).

[3] А.И. Лактионов. Оптика атмосф. и океана, **18** (11), 983 (2005). [A.I. Laktionov. Atmosph. Oceanic Opt., **18** (11), 886 (2005)].
[4] В.В. Бульон. Труды Зоологического института РАН, **321** (2), 115 (2017).
[5] А.С. Ульянцев, В.В. Очередник, Е.А. Романкевич. Докл. Академии наук, **460** (1), 93 (2015).
[6] А.Н. Дроздова. Опт. и спектр., **126** (3), 383 (2019). [A.N. Drozdova. Opt. Spectrosc., **126** (3), 303 (2019)]. DOI: 10.1134/S0030400X19030068
[7] И.В. Конюхов, А.Ф. Котикова, Т.А. Белевич, М.Д. Кравчишина, С.И. Погосян. Океанология, **61** (2), 264 (2021).
[8] О.В. Копелевич, И.В. Салинг, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец, С.В. Шеберстов, В.И. Буренков, П.Г. Каралли, А.В. Юшманова. *Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. (монография)* (Институт океанологии Российской академии наук, Ваш формат, М., 2018).
[9] Д.И. Глуховец. Океанологические исследования, **47** (1), 145 (2019). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(1).44
[10] Д.И. Глуховец, О.В. Копелевич, С.В. Шеберстов, И.В. Салинг. Фундаментальная и прикладная гидрофизика, **12** (4), 59 (2019). DOI: 10.7868/S2073667319040075
[11] А.В. Юшманова, С.В. Вазюля. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, **19** (5), 147 (2022). DOI: 10.3390/rs14194995
[12] О.А. Букин, С.С. Голик, П.А. Салюк, Е.Н. Бауло, И.А. Ластовская. Журн. прикл. спектр., **74** (1), 103 (2007). [O.A. Bukin, S.S. Golik , P.A. Salyuk, E.N. Baulo, I.A. Lastovskaya. J. Appl. Spectr., *74* (1), 115 (2007)]. DOI: 10.1007/s10812-007-0018-7
[13] С.П. Захарков, Т.Н. Гордейчук, Е.А. Штрайхерт. Биология моря, **45** (4), 267 (2019). DOI: 10.1134/S0134347519030112
[14] С.П. Пугач, И.И. Пипко, И.П. Семилетов, В.И. Сергиенко. ДАН, **465** (5), 608 (2015). DOI: 10.7868/S0869565215350194
[15] Т.Я. Чурилова, Т.В. Ефимова, Н.А. Моисеева, Е.Ю. Скороход. Фунд. и прикл. гидрофизика, **15** (3), 73 (2022). DOI: 10.48612/fpg/ex1p-9vtp-phu
[16] Е.Д. Краснова. Водные ресурсы, **48** (3), 323 (2021). [E.D. Krasnova. Water Resour., **48** (3), 427(2021)]. DOI: 10.1134/S009780782103009X
[17] Н.М. Кокрятская, Г.Н. Лосюк, Е.Д. Краснова, С.С. Попов, К.В. Титова, Д.А. Воронов. Океанология, **64** (3), 438 (2024). DOI: 10.31857/S0030157424030057
[18] Ю.Г. Соколовская, Н.А. Демиденко, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, А.С. Саввичев, С.В. Пацаева. Опт. и спектр., **132** (4), 374 (2024). [Yu.G. Sokolovskaya, N.A. Demidenko, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, A.S. Savvichev, S.V. Patsaeva. Opt. Spectrosc., **132** (4), 344 (2024)]. DOI: 10.61011/OS.2024.04.58215.25-24
[19] О.Н. Лунина, С.В. Пацаева, В.В. Кадников, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, Н.М. Кокрятская, А.С. Саввичев. Микробиология, **94** (6), 497 (2025). DOI: 10.31857/S0026365623600268
[20] Е.С. Колпакова, Г.Н. Лосюк, Н.М. Кокрятская, А.В. Вельямидова, Е.А. Вахрамеева. Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, **18** (3), 285 (2025).
[21] А.А. Жильцова, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, Ю.Г. Соколовская, С.В. Пацаева. Опт. и спектр., **132** (3), 214 (2024). [A.A. Zhiltsova, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, Yu.G. Sokolovskaya, S.V. Patsaeva. Opt. Spectrosc., **132** (3), 214 (2024)]. DOI: 10.61011/OS.2024.03.58143.22-24
[22] Н.М. Кокрятская, Г.Н. Лосюк, С.С. Попов, К.В. Титова. Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы III международной конференции. Казань: Издательство Академии наук РТ, 403 (2025).
[23] A.S. Savvichev, V.V. Kadnikov, I.I. Rusanov, A.V. Beletsky, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, A.Y. Kallistova, E.F. Veslopopova, E.E. Zakharova, N.M. Kokryatskaya, G.N. Losyuk, N.A. Demidenko, N.A. Belyaev, P.A. Sigalevich, A.V. Mardanov, N.V. Ravin, N.V. Pimenov. Front. Microbiol., **11**, 1945 (2020). DOI: 10.3389/fmicb.2020.01945
[24] О.А. Трубецкой, О.Е. Трубецкая. Водные ресурсы, **46** (4), 428 (2019). [O.A. Trubetskoj, O.E. Trubetskaya, Water Resour., **46** (4), 605 (2019)]. DOI: 10.1134/S0097807819040171
[25] Г.С. Карабашев. *Флюоресценция в океане* (Гидрометеоиздат, Л., 1987).
[26] Дж. Лакович. *Основы флуоресцентной спектроскопии* (Мир, М.,1986).
[27] D.F. Eaton. Pure & Appl. Chem., **60** (7), 1107 (1988).
[28] К.С. Шифрин. *Введение в оптику океана* (Гидрометеоиздат, Л., 1983).
[29] О.М. Горшкова, С.В. Пацаева, Е.В. Федосеева, Д.М. Шубина, В.И. Южаков. Вода: химия и экология, **11**, 31 (2009).
[30] Ю.Г. Соколовская, А.Д. Цветкова, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, С.А. Буриков, Т.А. Доленко, С.В. Пацаева. Опт. и спектр., **133** (5), 444 (2025). [Yu.G. Sokolovskaya, A.D. Tsvetkova, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, S.A. Burikov, T.A. Dolenko, S.V. Patsaeva. Opt. Spectrosc., **133** (5) 424 (2025)]. DOI: 10.61011/OS.2025.05.60781.25-25
[31] Ю.Г. Соколовская, А.А. Жильцова, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, С.В. Пацаева. Опт. и спектр., **131** (6), 872 (2023). [Yu.G. Sokolovskaya, A.A. Zhiltsova, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, S.V. Patsaeva. Opt. Spectrosc., **131** (6), 824 (2023)]. DOI: 10.21883/OS.2023.06.55924.111-23
[32] Yu.G. Sokolovskaya, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, D.N. Matorin, A.A. Zhiltsova, S.V. Patsaeva. Photonics, **10** (6), 672 (2023). DOI: 10.3390/photonics10060672
[33] Е.Д. Краснова, А.Н. Пантюлин, Д.Н. Маторин, Д.А. Тодоренко, Т.А. Белевич, И.А. Милютина, Д.А. Воронов. Микробиология, **83** (3), 346 (2014). [E.D. Krasnova, A.N. Pantyulin, D.N. Matorin, D.A. Todorenko, T.A. Belevich, I.A. Milyutina, D.A. Voronov. Microbiology, **83** (3), 270 (2014)].
[34] Д.Н. Маторин, Д.А. Тодоренко, Д.А. Воронов, С.Н. Горячев, Л.Б. Братковская, Е.Д. Краснова. Вестн. Моск. ун-та. Серия 16: Биология, **77** (3), 180 (2022). [D.N. Matorin, D.A. Todorenko, D.A. Voronov, S.N. Goryachev, L.B. Bratkovskaya, E.D. Krasnova. Moscow University Biological Sciences Bulletin, **77** (3), 165 (2022)]. DOI: 10.3103/S0096392522030075
[35] C.D. Clark, J. Jimenez-Morais, G. Jones, E. Zanardi-Lamardo, C.A. Moore, R.G. Zika. Marine Chemistry, **78** (2–3), 121 (2002).
[36] J. Liu, R. Zhou, X. Zhang. Water, **13**, 2182 (2021). DOI: 10.3390/w13162182
[37] Д.А. Хунджуа, В.И. Южаков, Б.Н. Корватовский, В.З. Пащенко, Л.С. Кулябко, К.А. Кыдралиева, С.В. Пацаева. Вестн. Моск. ун-та. Серия 3: Физ., астр., **6**, 55 (2018). [D.A. Khundzhua, V.I. Yuzhakov, B.N. Korvatovskiy, V.Z. Paschenko, L.S. Kulyabko, K.A. Kydralieva, S.V. Patsaeva. Moscow University Physics Bulletin, **73** (6), 632 (2018)]. DOI: 10.3103/S0027134918060152